

국부적 강성 증가를 고려한 지오그리드-보강기층 모델링



변용훈
경북대학교
/ 부교수
yhbyun@knu.ac.kr

1. 서론

지오그리드는 아스팔트포장에서 역학적 기층 보강에 매우 효과적이며, 이를 통해 기층 두께를 줄이거나 포장 수명을 연장하는 등의 상당한 이점을 기대할 수 있다. 기층 보강을 위해 지오그리드를 기층의 중간 깊이나 기층-지반 계면에 배치하는 방법이 사용된다. Moghaddas-Nejad과 Small (1996)의 연구 결과에 따르면, 이러한 위치에 지오그리드를 삽입했을 때 영구변형이 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 골재의 전단변형을 줄이고 이동을 방지함으로써 지오그리드의 사용은 골재기층에서 차량하중에 의한 침하를 현저히 감소시키는 효과를 가져왔다 (Al-Qadi 등, 2008). 최근 연구에서는 지오그리드 층수, 구속압력, 반복축차응력이 조립질 재료의 영구 변형 축적에 미치는 영향을 분석한 바 있다 (Cui 등, 2023).

이러한 연구들은 지오그리드에 의한 측면구속이 지오그리드로 보강된 기층의 주요 메커니즘으로 작용하며, 지오그리드와 골재 사이의 상호 결합이 측면구속의 주된 원인을 보여주었다. 예를 들어, Perkins 등 (2004)은 영구변형시험 중 지오그리드 보강 시편의 반경방향 변위가 높이에 따라 달라지는 것을 관찰했다. 또한, McDowell 등 (2006)은 인발시험을 통해 지오그리드 근처에서 강성이 더 높은 지오그리드 영향영역의 두께를 정량화하는 연구를 진행했다. Zhou 등 (2012)은 적용된 응력에 따른 영향영역의 확장을 마이크로 이미지 분석을 통해 드러냈다. 이러한 연구들은 지오그리드에 의한 보강이 영구변형 크기를 줄이는 데 얼마나 효과적인지를 보여준다. 특히, Singh 등 (2022)은 보강되지 않은 도로와 지오그리드로 보강된 도로 시험구간에서 이동하는 차량하중시험을 수행하여, 횡단면 영구 변형 표면 주상도에서 지오그리드 보강을 통한 영구변형 깊이 감소를 입증

했다.

한편, 벤더엘리먼트는 조립토의 전단탄성계수를 평가하기 위한 실내 지반공학시험에 널리 사용되고 있다. 연구목적에 따라 다양한 시험장비에 활용되어 왔으나, 골재 재료에 벤더엘리먼트 기반 전단파 측정 기술을 적용한 연구는 제한적으로 이루어져 왔다. 최근, Byun 과 Tutumluer (2017)는 반복삼축시험에서 1:1 종횡비를 가진 지오그리드 보강 골재 시편에 두 쌍의 벤더엘리먼트를 적용하여 지오그리드 근처의 강성 증가를 성공적으로 측정할 바 있다. 이어진 연구에서 2:1 종횡비를 가진 지오그리드 보강 시편에 대한 반복삼축시험을 통해, 지오그리드-골재 상호결합에 의한 보강변화를 분석하고, 전체 시편높이에서 지오그리드로 인한 국부적인 강성증가 효과를 규명하였다 (Byun과 Tutumluer, 2019; Byun 등, 2019). 이러한 연구 배경을 토대로, 본 기사는 국부적 강성증가를 고려한 지오그리드-보강기층 모델링에 대한 Byun 등 (2023)의 연구 결과를 소개하고자 한다.

2. 연구 내용

층상구조체의 탄성해석 및 설계소프트웨어 프로그램인 MnLayer를 사용하여 전형적인 아스팔트 포장에서 지오그리드 보강에 대한 3종류의 시나리오([1] 삼각형 및 [2] 사각형 지오그리드로 보강된 경우, [3] 미보강된 경우)에 대한 수치해석을 수행하였다. 층상 탄성해석 프로그램은 층별 탄성결과를 도출하기 위해 역 Hankel 변환을 효율적으로 사용한다(Khazanovich과 Wang 2007). 또한, 역학적-경험적 포장 설계 및 해석에서 지오그리드의 영향을 고려하기 위해, 지오그리드가 기층에서 생성하는 다양한 영역을 고려할 수 있는 층 분할법이 소개된 바 있다(Vavrik 2018). 따라서, 지오그리

드가 있는 포장 시나리오에서, 골재 기층은 네 개의 하위층으로 나눌 수 있다. 지오그리드 보강효과는 기층의 각 하위층에서 탄성계수의 기본값에 탄성계수 증폭비를 할당함으로써 시뮬레이션되었다. 탄성계수 증폭비는 실내시험의 지오그리드로 보강된 시편에서 획득된 국부적 탄성계수에 기반하여 결정되었다. 본 연구에서는 아스팔트포장의 지오그리드-보강기층의 층상 탄성해석을 위하여, 반복삼축시험에서 지오그리드 보강 골재시편의 전단파 측정으로 추정된 탄성계수가 사용되었다.

수치해석을 위한 포장구조는 102 mm 두께의 아스팔트층, 305 mm 기층, 그리고 62 MPa의 탄성계수를 가진 상대적으로 약한 노상으로 구성되었다. 기층의 탄성계수 기본값은 207 MPa로 설정되었고, 아스팔트층의 탄성계수는 21°C에서의 아스팔트 탄성계수의 전형적인 값인 3,447 MPa로 설정되었다. 노상, 기층, 아스팔트층의 포아송비는 각각 0.45, 0.35, 0.35로 설정되었다. 층간 경계면에서의 전면 접촉 및 미끄러짐이 없는 것으로 가정되었고, 다른 층간 경계면에서의 마찰계수는 약 1,000으로 설정되었다. 지오그리드로 보강된 기층이 있는 포장구간에서, 기층은 층상포장체의 탄성해석에서 각 하위층 경계면에 마찰계수가 0인 4개

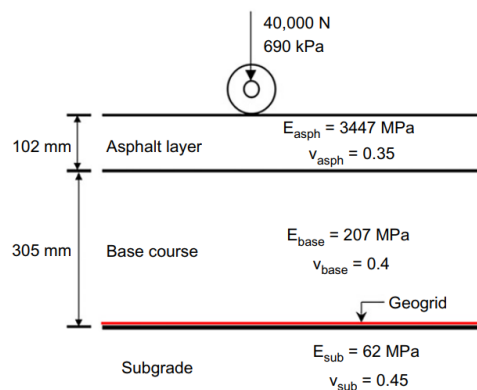


그림 1. 전형적인 아스팔트포장 구간에 대한 하부구조 모식도 및 층별 물성.

표 1. 기층 내 하부층의 두께 및 탄성계수 증폭비.

Sublayer in base course	Thickness (mm)	Resilient modulus enhancement ratio	
		Triangular geogrid	Square geogrid
1	152	1.00	1.00
2	61	1.04	1.01
3	61	1.39	1.38
4	30	2.13	1.60

의 하위층으로 나누어졌다. 분석된 포장구조는 그림 1에 나타나 있으며, 지오그리드 보강기층의 하위층 두께와 탄성계수 증폭비에 대한 세부사항은 표 1에 요약되어 있다.

포장층 표면에는 690 kPa의 공기압을 가진 슈퍼 싱글타이어를 통하여 40 kN의 하중이 재하되었다. 축대칭 층상탄성해석에서는 136 mm 반경의 단순화된 균일 원형 하중이 가정되었다. 3종류의 포장시나리오(지오그리드 보강 및 미보강된)는 각 포장층의 다양한 위치에서 반응을 평가하기 위해 분석되었다.

기층 하단에 삼각형 및 사각형 지오그리드로 보강된 포장과 미보강된 포장을 분석하여, 바퀴자국 아래에 아스팔트층 하단에서 수평응력/변형과 기층 중간깊이에서 수직 및 수평응력/변형 분포를 도출하였다. 이 세 시나리오에서 응력과 변형의 변화는 지오그리드 보강이 골재 기층을 포함한 포장구조 내 응력/변형 분포에 미치는 영향을 보여준다. 그림 2는 아스팔트층 하단에서 수평방향으

로 예측된 응력과 변형 분포를 보여준다. 미보강된 포장시나리오에서 아스팔트층 하단의 인장 응력과 변형이 가장 크고, 삼각형 지오그리드의 경우 가장 낮다. 수평거리가 증가함에 따라 응력이 크게 감소하여 모든 시나리오에서 바퀴자국의 중심으로부터 25.4 cm 떨어진 지점에서 0에 근접한다. 삼각형 및 사각형 지오그리드 보강시나리오에서 바퀴자국 중심아래 인장응력과 인장변형은 각각 4.1%와 3.7% 감소했다.

그림 3은 지오그리드 보강이 기층 중간깊이에서 수평방향 응력분포에 미치는 영향을 보여준다. 그림 3(a)에서는 지오그리드로 보강된 경우 압축 응력이 크게 증가했다. 또한, 보강되지 않은 시나리오와 보강된 시나리오 간 응력분포 패턴의 변화가 나타났다. 삼각형 지오그리드 보강 시나리오에서는 기층 하부층의 탄성계수 증폭비가 가장 크기 때문에 가장 큰 압축응력이 관찰되었다. 반면에, 그림 3(b)는 두 지오그리드 보강 시나리오에서 수평변형이 크게 감소했음을 보여준다. 특히 삼각형 지오그리드 보강 시나리오에서는 바퀴자국 중심에서 인장변형이 25.3% 감소했다. 삼각형 지오그리드 보강 시나리오에서 인장변형이 감소하고 압축응력이 증가함을 고려할 때, 기층 내 지오그리드 근처에 높은 국부적 강성을 할당하면 각 포장층의 반응이 보다 정확해지는 것으로 나타났다.

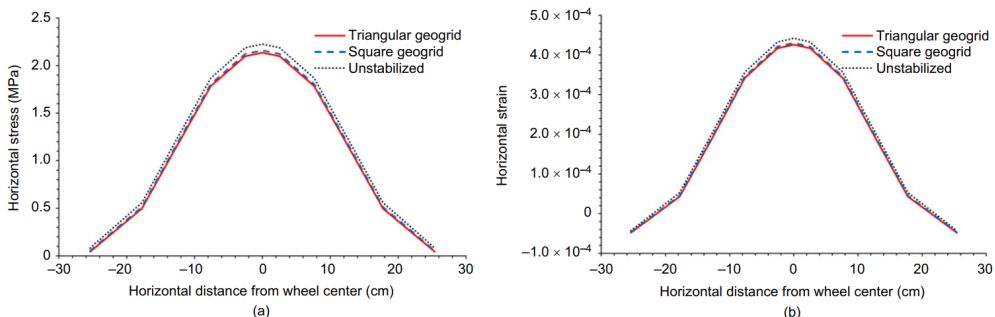


그림 2. 3개의 포장시나리오의 아스팔트층 바닥에서 예측된 수평방향 (a) 응력 및 (b) 변형 분포.

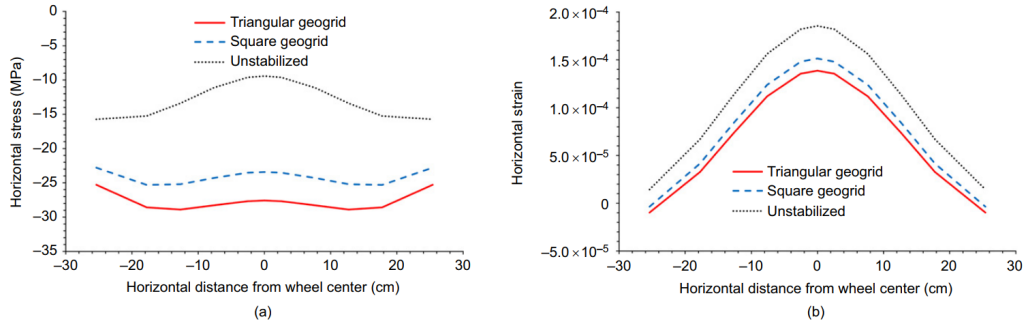


그림 3. 포장시나리오의 기층 중간깊이에서 예측된 수평방향 (a) 응력 및 (b) 변형 분포.

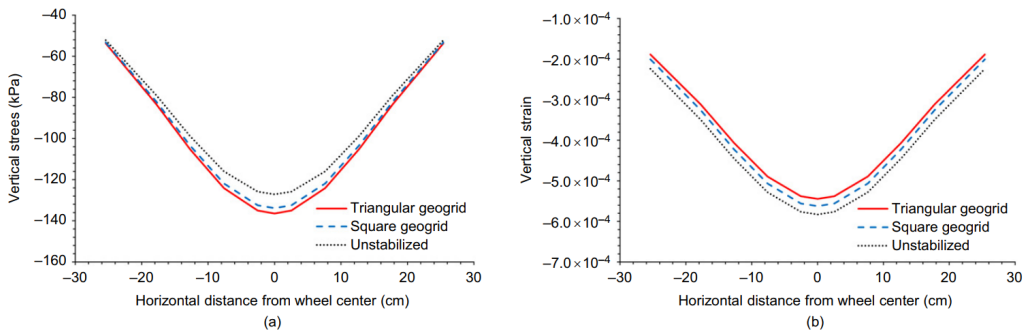


그림 4. 포장시나리오의 기층 중간깊이에서 예측된 수직방향 (a) 응력 및 (b) 변형 분포.

그림 4는 골재 기층 중간깊이에서 예측된 수직 응력과 변형 분포를 보여준다. 모든 시나리오에서 바퀴자국 중심아래의 압축 응력과 변형이 다른 수평거리에 비해서 가장 크게 나타났다. 삼각형 지오그리드 시나리오에서 수직응력이 가장 크며, 미보강된 시나리오에서는 수직응력이 가장 낮게 나타났다(그림 4(a) 참조). 지오그리드 근처의 높은 국부적 강성으로 인해 두 지오그리드 보강 시나리오의 미보강된 시나리오에 비해 수직변형이 낮음을 보여준다(그림 4(b) 참조).

아스팔트층 하단과 기층 중간깊이에서 바퀴자국 중심아래의 예측된 수평 응력과 변형은 그림 5에 나타나 있다. 그림 5(a)에서는 기층에 지오그리드를 사용할 경우 아스팔트층 하단에서 변형과 응력이 감소한다. 이 결과는 수치해석시, 지오그리드 근처에 높은 국부적 강성을 할당하였기 때문

이다. 그림 5(b)에서는 지오그리드 보강이 기층에 미치는 영향으로 인해 보강된 기층에 의한 응력분포가 높아지는 동시에 기층 내부의 변형이 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

바퀴자국 중심아래 다른 두 층에서 지오그리드 보강이 수직 응력과 변형에 미치는 영향을 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)는 기층 중간깊이에서 수직 응력과 변형을 보여준다. 해석결과, 삼각형 지오그리드를 사용하는 경우 미보강된 시나리오에 비해 압축응력이 7.3% 증가하고 압축변형이 6.6% 감소함을 보여준다. 사각형 지오그리드의 경우, 압축응력은 최대 5.3% 증가하고 압축변형은 최대 3.5% 감소하였다. 그림 6(b)에 나타난 포장반응은 노상의 침하 발생을 보여준다. 지오그리드가 노상 상단에 배치되어 역학적 보강효과를 제공함으로써, 노상 상단의 수직 응력과 변형이

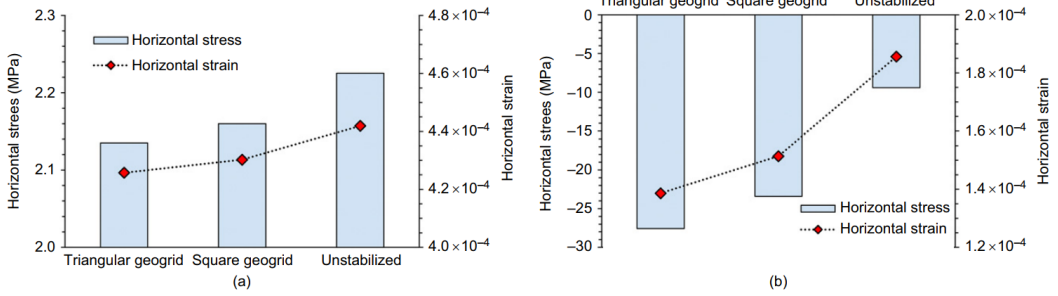


그림 5. 포장시나리오의 바퀴경로 아래에서 예측된 수평응력 및 수평변형: (a) 아스팔트 층의 바닥; (b) 기층의 중간깊이.

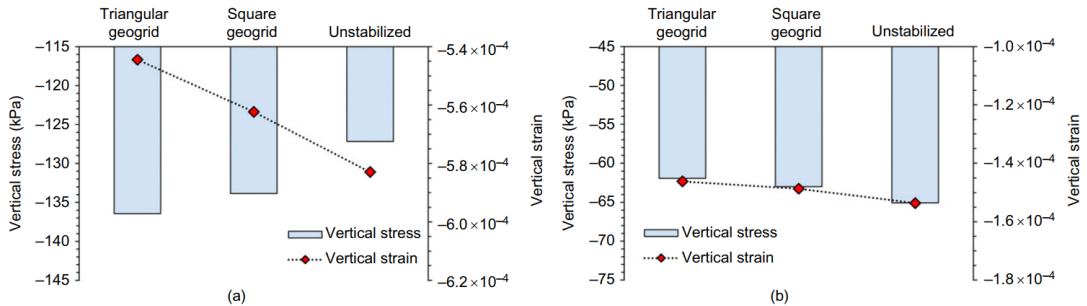


그림 6. 포장시나리오의 예측된 수직응력 및 수직변형: (a) 기층의 중간깊이; (b) 하층 상단

최대 4.9% 감소하여 노상의 침하 가능성과 크기가 낮아질 수 있음을 보여주었다. Kwon (2007)은 선형 및 비선형 탄성해석을 기반으로 지오그리드 보강이 지오그리드가 없는 구간에 비해 노상상단에서 수직 응력과 변형이 낮아짐을 보고한 바 있다. 다른 포장반응과 마찬가지로, 기층 하부층의 탄성계수 증폭비가 가장 큰 삼각형 지오그리드 포장 시나리오에서 수직 응력과 변형이 가장 크게 감소되었다. 그러나, 본 연구에서는 특정 골재와 2종류의 지오그리드만을 사용했기 때문에 획득된 수평강성 프로파일은 일반화될 수 없다.

3. 요약

측면구속은 지오그리드에서 골재 입자의 상호 결합과 관련된 주요 보강 메커니즘으로 알려져 있

다. 본 연구에서는 실내실험을 통해 얻은 지오그리드-골재 상호결합에 의한 국부적 강성증가에 대한 결과를 토대로, 지오그리드로 보강된 기층을 포함한 포장구조체의 탄성 반응 특성을 파악하고자 하였다. 기존의 실험적 연구에서는 지오그리드 배치된 시편 중간 높이로부터 거리가 멀어질수록 전단파 측정에서 추정된 전단탄성계수가 감소한다는 것을 보여주었다. 또한, 삼각형 지오그리드 근처의 강성 증가가 사각형 지오그리드 근처보다 크게 나타났다. 이러한 전단탄성계수 추상도를 기반으로, 수치해석적 연구에서는 기층의 4 개 하부층에 대한 탄성계수 값을 다르게 할당되었다. 층상 탄성해석 프로그램을 사용한 수치해석적 연구는 아스팔트층 하단에서 두 지오그리드 보강 포장시나리오의 수평방향 인장 응력과 변형이 미보강된 시나리오에 비해 감소했음을 보여주었다. 기

층 중간깊이에서는 지오그리드 보강 포장시나리오의 압축응력이 미보강된 시나리오에 비해 보다 크게 나타났으며, 지오그리드 보강구간의 인장변형은 미보강된 구간보다 작게 나타났다. 삼각형 및 사각형 지오그리드의 사용은 기층 중간깊이에서 미보강된 시나리오에 비해 수직압축응력을 증가시키고 수직압축변형을 감소시켰다. 노상 상단에서는 지오그리드 보강 포장 구간의 수직 응력과 변형이 미보강된 구간보다 작았는데, 이는 노상의 침하 가능성이 낮다는 것을 보여주었다. 따라서, 지오그리드와 골재 간 미세역학적 상호결합을 기반으로 한 거시적 모델링 방법은 지오그리드로 보강된 아스팔트포장시스템의 역학적 분석에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Al-Qadi, I.L., Dessouky, S., Kwon, J., & Tutumluer, E. 2009. Geogrid in Flexible Pavements: Validated Mechanism,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2045: 102–109.
2. Byun, Y.H. & Tutumluer, E. 2017. Bender Elements Successfully Quantified Stiffness Enhancement Provided by Geogrid – Aggregate Interlock, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2656: 31–39.
3. Byun, Y. H., & Tutumluer, E. (2019). Local stiffness characteristic of geogrid–stabilized aggregate in relation to accumulated permanent deformation behavior. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(3), 402–407.
4. Byun, Y.H., Tutumluer, E., Feng, B., Kim, J.H., Wayne, M.H. 2019. Horizontal stiffness evaluation of geogrid–stabilized aggregate using shear wave transducers. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(2), 177–186.
5. Byun, Y. H., Qamhia, I. I. A., Kang, M., Tutumluer, E., & Wayne, M. H. (2023). Modeling geogrid–stabilized aggregate base courses considering local stiffness enhancement. *Geosynthetics International*, 1–10.
6. Cui, K., Zhang, D., Li, Q., Yang, S., & Zhang, H. (2023). Experimental investigation on the accumulated strain of coarse–grained soil reinforced by geogrid under high–cycle cyclic loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 51(1), 233–244.
7. Khazanovich, L. & Wang, Q. 2007. MnLayer: high–performance layered elastic analysis program. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2037: 63–75.
8. Kwon, J. (2007). Development of a mechanistic model for geogrid reinforced flexible pavements (Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana–Champaign), Urbana, Illinois, 241 pages.
9. McDowell, G.R., Harireche, O., Konietzky, H., Brown, S.F., Thom, N.H. 2006. Discrete Element Modelling of Geogrid–Reinforced Aggregates. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering* 159(1): 35–48.
10. Moghaddas–Nejad, F. & Small, J.C. 1996. Effect of Geogrid Reinforcement in Model Track Tests on Pavement. *Journal of Transportation*

Engineering 122(6): 468–474.

11. Perkins, S.W., Christopher, B.R., Cuelho, E.L., Eiksund, G.R., Hoff, I., Schwartz, C.W., Svano, G., Watn, A. 2004. Development of Design Methods for Geosynthetic Reinforced Flexible Pavements, FHWA Report DTFH61–01–X–00068.
12. Singh, M., Trivedi, A., & Shukla, S. K. (2022). Evaluation of geosynthetic reinforcement in unpaved road using moving wheel load test. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(4), 581–589.
13. Vavrik, W. 2018. Recommended practice for incorporating geogrids in ME pavement design. Presentation at the Tensar International Congress, Roatan, Honduras, by Bill Vavrik of Applied Research Associates on July 26, 2018.
14. Zhou, J., Chen, J. F., Xue, J. F., & Wang, J. Q. (2012). Micro–mechanism of the interaction between sand and geogrid transverse ribs. *Geosynthetics International*, 19(6), 426–437.